

学校编码: 10384  
学号: 20720061152077

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**Fe-Co-(Nb, Zr) 相平衡的实验测定与  
热力学计算**

**Experimental Determination and Thermodynamic  
Calculation of Phase Equilibria in the Fe-Co-(Nb, Zr)  
Systems**

张惠红

指导教师姓名: 刘 兴 军 教 授

专 业 名 称: 材料物理与化学

论文提交日期: 2009 年 6 月

论文答辩日期: 2009 年 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2009 年 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

## 目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 Fe-Co 基合金的性能特点与研究背景.....	1
1.1.1 Fe, Co 元素的性能特点.....	1
1.1.2 Fe-Co 基合金的研究背景.....	2
1.2 相图及相图计算方法.....	3
1.2.1 相图及其测定方法.....	5
1.2.2 相图计算方法.....	6
1.2.2.1 相图计算的原理.....	7
1.2.2.2 相图计算的步骤.....	7
1.2.2.3 相图计算的优点.....	9
1.2.3 相图计算中常用的热力学模型.....	9
1.2.3.1 理想溶体模型.....	10
1.2.3.2 正规溶体模型.....	10
1.2.3.3 亚正规溶体模型.....	11
1.2.3.4 亚点阵模型.....	12
1.2.4 相图热力学与非晶态材料设计.....	13
1.2.4.1 非晶态材料概述.....	13
1.2.4.2 相图在非晶态材料设计中的应用.....	14
1.3 本研究的目的是和内容.....	15
参考文献.....	17
第二章 实验方法与热力学模型.....	20
2.1 本研究中采用的实验方法.....	20
2.1.1 合金样品的制备.....	20
2.1.2 热处理方法 (合金法).....	20
2.1.3 显微组织观察.....	21

2.1.4 成分分析.....	21
2.1.5 X-ray 结构分析.....	21
2.1.6 相转变温度的测定.....	22
2.1.7 非晶态薄带的制备.....	22
<b>2.2 本研究中采用的热力学模型.....</b>	<b>22</b>
2.2.1 纯组元.....	23
2.2.2 液相和端际固溶体相.....	23
2.2.3 化学计量比化合物相.....	25
2.2.4 金属间化合物溶体相.....	25
<b>参考文献.....</b>	<b>30</b>
<b>第三章 Co-Zr 二元系相图的实验测定与热力学优化.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 引言.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Co-Zr 二元系相平衡的研究现状.....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Co-Zr 二元系相图的实验测定.....</b>	<b>32</b>
3.3.1 实验方法.....	32
3.3.2 Co-Zr 二元系的实验结果与讨论.....	33
<b>3.4 热力学优化与计算过程.....</b>	<b>34</b>
<b>3.5 计算结果与讨论.....</b>	<b>35</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>36</b>
<b>第四章 Fe-Co-Zr 三元系相图的实验测定与热力学优化.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 引言.....</b>	<b>53</b>
<b>4.2 Fe-Co-Zr 三元系的实验相图信息.....</b>	<b>53</b>
4.2.1 基础二元系.....	53
4.2.1.1 Fe-Zr 二元系.....	53
4.2.1.2 Fe-Co 二元系.....	54
4.2.2 Fe-Co-Zr 三元系.....	54
<b>4.3 Fe-Co-Zr 三元系相平衡的实验测定.....</b>	<b>55</b>
4.3.1 实验方法.....	55
4.3.2 Fe-Co-Zr 三元系的实验结果与讨论.....	56

4.4 热力学优化与计算过程.....	58
4.5 计算结果与讨论.....	59
参考文献.....	60
第五章 Fe-Co-Nb 三元系相图的实验测定与热力学优化.....	84
5.1 引言.....	84
5.2 Fe-Co-Nb 三元系的实验相图信息.....	84
5.2.1 基础二元系.....	84
5.2.1.1 Fe-Nb 二元系.....	84
5.2.1.2 Co-Nb 二元系.....	85
5.2.2 Fe-Co-Nb 三元系.....	86
5.3 Fe-Co-Nb 三元系等温截面相平衡的实验测定.....	87
5.3.1 实验方法.....	87
5.3.2 Fe-Co-Nb 三元系的实验结果与讨论.....	87
5.4 热力学优化与计算过程.....	90
5.5 计算结果与讨论.....	90
参考文献.....	92
第六章 相图计算在非晶态合金成分设计中的应用.....	122
6.1 引言.....	122
6.1.1 非晶态合金的玻璃形成能力.....	122
6.1.2 Fe 基非晶态合金的研究现状.....	123
6.1.3 Ni-Nb-Ti 三元系相图与非晶态合金的成分设计.....	123
6.2 (Fe, Co, Ni)-(Nb, Zr)-Ti 非晶态薄带的制备 .....	124
6.2.1 实验方法.....	124
6.2.2 实验结果与讨论.....	125
参考文献.....	127
第七章 结论.....	136
致谢.....	137
攻读硕士学位期间科研成果以及获得奖励.....	138

# CONTENTS

<b>Abstract (Chinese)</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	II
<b>CHAPTER 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 Properties and research background of the Fe-Co base alloys</b> .....	1
1.1.1 Properties of Fe and Co elements .....	1
1.1.2 Research background of the Fe-Co base alloys .....	2
<b>1.2 Phase diagram and CALPHAD method</b> .....	3
1.2.1 Phase diagram and its determination method .....	5
1.2.2 CALPHAD method .....	6
1.2.2.1 The principle of CALPHAD method .....	7
1.2.2.2 The procedure of CALPHAD method .....	7
1.2.2.3 The advantages of CALPHAD method .....	9
1.2.3 Introduction of thermodynamic models .....	9
1.2.3.1 Ideal solution .....	10
1.2.3.2 Regular solution .....	10
1.2.3.3 Sub-regular solution .....	11
1.2.3.4 Sublattice model .....	12
1.2.4 Phase diagram and amorphous material design .....	13
1.2.4.1 Summarize of the amorphous alloys .....	13
1.2.4.2 The application of the CALPHAD method in the design of amorphous alloys .....	14
<b>1.3 Major purpose and content of this work</b> .....	15
<b>Reference</b> .....	17
<b>CHAPTER 2 Experimental methods and thermodynamic models</b> .....	20
<b>2.1 Experimental methods used in this work</b> .....	20

2.1.1 The preparation of alloy samples. ....	20
2.1.2 Heat treatment method. ....	20
2.1.3 Observation of microstructures. ....	21
2.1.4 Determination of alloy composition. ....	21
2.1.5 Analyzation of structures by XRD. ....	21
2.1.6 determination of the temperature of phase transformation. ....	22
2.1.7 The preparation of amorphous ribbons. ....	22
<b>2.2 Thermodynamic models used in this work. ....</b>	<b>22</b>
2.2.1 Pure elements. ....	23
2.2.2 Liquid and other solutions. ....	23
2.2.3 Stoichiometric phases. ....	25
2.2.4 Extended solid solution. ....	25
<b>Reference. ....</b>	<b>30</b>
<b>CHAPTER 3 Experimental determination and thermodynamic assessment of phase equilibria in the Co-Zr binary system. ....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Introduction. ....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Research progress of phase equilibria. ....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Experimental investigation of phase equilibria in the Co-Zr binary system. ....</b>	<b>32</b>
3.3.1 Experimental method. ....	32
3.3.2 Experimental results and discussion. ....	33
<b>3.4 Optimization procedure. ....</b>	<b>34</b>
<b>3.5 Results and discussion. ....</b>	<b>35</b>
<b>Reference. ....</b>	<b>36</b>
<b>CHAPTER 4 Experimental determination and thermodynamic assessment in the Fe-Co-Zr ternary system. ....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 Introduction. ....</b>	<b>53</b>
<b>4.2 Experimental information. ....</b>	<b>53</b>



4.2.1 Basic binary system. ....	53
4.2.1.1 Fe-Zr binary system. ....	53
4.2.1.2 Fe-Co binary system. ....	54
4.2.2 Fe-Co-Zr ternary system. ....	54
<b>4.3 Experimental investigation of phase equilibria in the Fe-Co-Zr ternary system. ....</b>	<b>55</b>
4.3.1 Experimental method. ....	55
4.3.2 Experimental results and discussion. ....	56
<b>4.4 Optimization procedure. ....</b>	<b>58</b>
<b>4.5 Results and discussion. ....</b>	<b>59</b>
<b>Reference. ....</b>	<b>60</b>
 <b>CHAPTER 5 Experimental determination and thermodynamic assessment in the Fe-Co-Nb ternary system. ....</b>	 <b>84</b>
<b>5.1 Introduction. ....</b>	<b>84</b>
<b>5.2 Experimental information. ....</b>	<b>84</b>
5.2.1 Basic binary system. ....	84
5.2.1.1 Fe-Nb binary system. ....	84
5.2.1.2 Co-Nb binary system. ....	85
5.2.2 Fe-Co-Nb ternary system. ....	86
<b>5.3 Experimental investigation of phase equilibria in the Fe-Co-Nb ternary system. ....</b>	<b>87</b>
5.3.1 Experimental method. ....	87
5.3.2 Experimental results and discussion. ....	87
<b>5.4 Optimization procedure. ....</b>	<b>90</b>
<b>5.5 Results and discussion. ....</b>	<b>90</b>
<b>Reference. ....</b>	<b>92</b>
 <b>CHAPTER 6 The application of the CALPHAD technology in the design of amorphous alloy. ....</b>	 <b>122</b>

<b>6.1 Introduction</b> .....	122
6.1.1 The glass forming ability of the amorphous alloys.....	122
6.1.2 Research progress of Fe-based amorphous alloys.....	123
6.1.3 Ni-Nb-Ti phase diagram and the design of the amorphous alloys.....	123
<b>6.2 The preparation of (Fe, Co, Ni)-(Nb, Zr)-Ti amorphous ribbons</b> .....	124
6.2.1 Experimental method.....	124
6.2.2 Experimental results and discussion.....	125
<b>Reference</b> .....	127
<b>CHAPTER 7 Conclusions</b> .....	136
<b>Acknowledgements</b> .....	137
<b>Publications and awards</b> .....	138

## 摘 要

Fe-Co 基合金由于其具有优异的软磁性能,良好的抗氧化和抗腐蚀性能及优异的综合力学性能和良好的生理相容性,广泛用于制造软磁材料、高温合金,在化学化工、能源、航空、医疗等方面占据着重要地位。相图计算在金属材料成分设计中有重大应用,因此,有必要掌握相图和热力学信息。本论文通过实验测定和热力学计算两种途径研究了 Co-Zr 二元系、Fe-Co-Zr 和 Fe-Co-Nb 三元系在不同温度时全成分范围内的相平衡,主要研究工作如下:

(1) 实验测定了 Co-Zr 二元系在 500℃到 1350℃之间全成分范围内的相平衡,对已报道的 Co-Zr 二元系的实验信息进行了修正和补充。

(2) 首次实验测定了 Fe-Co-Zr 三元系在 1300℃、1200℃和 1100℃时全成分范围内的等温截面相图,并对已报道的 Fe-Co-Zr 三元系在 1000℃时的等温截面相图进行了修正和补充。

(3) 首次实验测定了 Fe-Co-Nb 三元系在 1300℃、1200℃、1100℃、800℃和 700℃时全成分范围内的等温截面相图,并对已报道的 Fe-Co-Nb 三元系在 1000℃和 900℃时的等温截面相图进行了修正和补充。

(4) 结合本研究的实验结果,系统地收集、整理和评估现有的热力学和相图数据,采用合理的热力学模型,利用 CALPHAD 技术对 Co-Zr 二元系、Fe-Co-Zr 和 Fe-Co-Nb 三元系的相平衡进行了热力学优化与计算。

(5) 本研究结合相平衡的计算结果设计  $\text{Ni}_{57.4}\text{Nb}_{26.97-x}\text{Ti}_{15.63}\text{Zr}_x$ 、 $\text{Co}_y\text{Ni}_{57.4-y}\text{Nb}_{23.97}\text{Ti}_{15.63}\text{Zr}_3$ 、 $\text{Fe}_x\text{Ni}_{57.4-x}\text{Nb}_{23.97}\text{Ti}_{15.63}\text{Zr}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{Co}_z\text{Ni}_{57.4-2z}\text{Nb}_{23.97}\text{Ti}_{15.63}\text{Zr}_3$  多个体系的非晶合金成分,初步探索了相图计算在铁基非晶态材料成分设计中的应用。

本研究获得的相平衡实验结果以及优化获得的热力学参数,将作为高性能 Fe 基非晶态合金热力学数据库的一个重要组成部分,同时,该研究结果将为高温合金及 Fe 基非晶态合金的成分设计及制备提供重要的理论依据。

关键词: Fe-Co基合金; CALPHAD; 相图

## Abstract

Fe-Co base alloys are widely used as soft magnetic materials and ultrahigh-temperature alloys in the field of chemistry and chemical engineering, energy, aviation and medical due to their good soft magnetism, good anti-oxidation and corrosion resistance, excellent mechanical properties and good biological compatibility. Because the CALPHAD technology has the important application in the designing of metallic alloys, it is necessary to investigate the phase diagrams and thermodynamic properties of the involved systems.

In the present work, the experimental determination and thermodynamic assessment in the phase equilibria of the Co-Zr binary system and Fe-Co-X (X: Nb, Zr) two ternary systems were carried out. Major research contents are listed as follows:

(1) The phase equilibria of the Co-Zr binary system from 500°C to 1350°C have been experimentally determined in the whole compositional range and the phase diagram in the Co-Zr binary system have been modified.

(2) The phase equilibria of the Fe-Co-Zr ternary system at 1300°C, 1200°C, and 1100°C have been experimentally determined for the first time, and the experimental information of the reported Fe-Co-Zr ternary system at 1000°C have been modified.

(3) The phase equilibria of the Fe-Co-Nb ternary system at 1300°C, 1200°C, 1100°C, 800°C and 700°C have been experimentally determined for the first time, and the experimental information of the reported Fe-Co-Nb ternary system at 1000°C and 900°C have been modified.

(4) On the basis of experimental data obtained by this work and previous reports, the phase equilibria of the Co-Zr binary system, Fe-Co-Zr and Fe-Co-Nb two ternary systems have been calculated and optimized. The calculated results are in good agreements with the experimental data.

(5) The compositions of the  $\text{Ni}_{57.4}\text{Nb}_{26.97-x}\text{Ti}_{15.63}\text{Zr}_x$ 、 $\text{Co}_y\text{Ni}_{57.4-y}\text{Nb}_{23.97}\text{Ti}_{15.63}\text{Zr}_3$ 、 $\text{Fe}_x\text{Ni}_{57.4-x}\text{Nb}_{23.97}\text{Ti}_{15.63}\text{Zr}_3$ 、 $\text{Fe}_z\text{Co}_z\text{Ni}_{57.4-2z}\text{Nb}_{23.97}\text{Ti}_{15.63}\text{Zr}_3$  amorphous alloys have been designed based on the thermodynamic parameters obtained by this study, and the

application of the CALPHAD technology in the designing of amorphous alloy has been studied in the present work.

The obtained results in this work can be applied to establish the thermodynamic database of Fe-based amorphous alloys. In addition, the results in this work can provide important theoretical guidance on designing high performance Fe-based amorphous alloys and ultrahigh-temperature alloys.

Keywords: Fe-Co base alloys; CALPHAD; Phase diagram

## 第一章 绪 论

### 1.1 Fe-Co 基合金的性能特点与研究背景

#### 1.1.1 Fe, Co 元素的性能特点

##### (1) Fe 元素的性能特点

金属铁 (Iron) 在门捷列夫元素周期表中属于Ⅷ族金属, 化学符号为 Fe, 原子序数是 26, 相对原子质量是 55.847。纯 Fe 的主要物理性质见表 1.1.1。

Fe 是地壳中较丰富的元素, 仅次于 O、Si、Al。它的发现和大规模使用, 是人类发展史上的一个光辉里程碑, 把人类从石器时代、铜器时代带到了铁器时代, 推动了人类文明的发展。至今, 铁仍然是现代工业的基础, 人类进步所必不可少的金属材料。目前, 磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿和菱铁矿是重要的铁矿。

金属铁呈现银白色的金属光泽, 硬而有延展性, 有很强的铁磁性, 并有良好的可塑性和导热性。常温时, Fe 在干燥的空气里不易与 O、S、Cl<sub>2</sub> 等非金属单质起反应, 在高温时则反应剧烈。Fe 易溶于稀的无机酸和浓盐酸, 生成二价铁盐, 并释放出 H<sub>2</sub>。常温下 Fe 遇浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 或浓 HNO<sub>3</sub> 时, 表面生成一层氧化物保护膜, 使其“钝化”, 故可用铁制品盛装浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 或浓 HNO<sub>3</sub>。

以铁为基制成的高温合金由于其具有较高的高温强度, 良好的抗氧化、抗腐蚀、抗疲劳性能和断裂韧性等综合性能而被广泛用于制造航空、舰艇和工业用燃气轮机的涡轮叶片、导向叶片、涡轮盘、高压压气机盘和燃烧室等高温部件; 还用于制造航天飞行器、火箭发动机、核反应堆、石油化工设备以及煤的转化等能源转换装置。此外, 铁合金还被广泛用于制作高强度、高硬度、高耐磨性、耐腐蚀性、超塑性及优异的软磁性能的非晶态合金, 广泛应用于各种高频功率器件和传感器, 成倍减少器件的质量和体积并提高精度, 大大提高其工作效率。

##### (2) Co 元素的性能特点

钴 (Cobalt) 在门捷列夫元素周期表中属于Ⅷ族金属, 化学符号为 Co, 原子序数是 27, 原子量是 58.9332。纯钴的主要物理性质见表 1.1.1。

钴在地壳中含量不小, 大于常见金属铅、锡等, 但比铁少得多。1735 年, 瑞典的布朗特在煅烧钴矿时得到钴, 并将之列为半金属。1780 年, 柏格曼制得

纯钴，钴被确立为一种元素。1789 年，拉瓦锡首次把钴列入元素表中。砷钴矿和辉砷钴矿是自然界中的主要钴矿，把辉砷钴矿或砷钴灼烧成氧化物后用铝还原即可制得纯 Co。

金属钴比铁具有更强的硬度和延展性，但磁性较差，与钐、镍、铝等共熔可得良好的磁性钢。钴与水 and 空气不发生作用，但能迅速地被盐酸、硫酸和硝酸所侵蚀，还会缓慢地被氢氟酸、氨水和氢氧化钠所侵蚀。

钴合金可用来制造喷气飞机的推进器和其他在高温下运转的装置，也可用来制造超硬耐热合金、磁性合金、碳化钨的基体或粘合剂。钴的其他化合物可用作催化剂。它的放射性同位素则可用于治疗癌症。<sup>60</sup>Co 是一种放射源，可以代替 X 射线和镅用以检查物体内部的结构，探测物体内部存在的裂缝和异物。

表 1.1 Fe, Co 元素的主要物理性质

Table 1.1 The Basic Properties of Unalloyed Iron and Cobalt

元素	物理特征	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	熔点	沸点	化合价	电离能
Fe	银白色	7.86	1538℃	2750℃	+2, +3	7.87eV
Co	银白色	8.9	1495℃	2870℃	+2, +3	7.86eV

### 1.1.2 Fe-Co 基合金的研究背景

随着信息时代的到来以及科学技术的高速发展，对材料的性能提出了越来越高的要求。Fe-Co 基合金由于其具有优异的磁学性能而被广泛应用于制作软磁材料，同时也可用于制作具有较高的高温强度，良好的抗氧化和抗腐蚀性能，良好的抗疲劳性能、断裂韧性等综合性能的高温合金材料。

Fe-Co 基合金作为软磁材料具有一系列优异的磁性能<sup>[1-4]</sup>：高饱和磁化强度，高起始磁导率和最大磁导率，磁滞伸缩小，居里温度高等，且当钴含量为 35 wt.% 左右时，其比饱和磁化强度高达  $240\text{A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ，一般用来制造高饱和磁感材料、高温软磁材料、超硬耐热合金、碳化钨的基体或粘合剂，在化学化工、能源、航空等方面都占据着重要地位，广泛用于喷气式飞机，燃气轮机和其他在高温下运转的装置。同时又由于其具有良好的生理相容性，在医疗方面也获得了广泛的应用。

当 Fe-Co 合金粉末粒径减小至亚微米级 ( $< 1 \mu\text{m}$ ), 甚至纳米级时, 由于材料具有大的比表面积, 在满足趋肤深度 (在高频电路中可以采用空心导线代替实心导线, 此导线的厚度称为趋肤深度) 的条件下, 与电磁波接触面积增大, 可以有效地吸收电磁波, 加之金属微粒具有良好的铁磁性, 因此与电磁波相互作用增强, 可更有效地衰减电磁波, 如再以高温性能良好的陶瓷材料作为基体, 超细 Fe-Co 合金粉末颗粒有望成为频带宽、高衰减、耐高温的吸波材料<sup>[5, 6]</sup>。

综上所述, Fe-Co 基合金材料是一种综合性能优异的软磁材料, 但是其脆化成为 Fe-Co 基合金应用的最大瓶颈。为了降低其脆化, 采用合金化的方法, 即添加第三或是第四组元, 如 V、Cr、Ni、Nb 等。这些合金元素一方面与 Fe-Co 合金中的杂质反应改善了合金的软磁性能; 另一方面还可改善 Fe-Co 基合金材料的综合力学性能<sup>[7, 8]</sup>。另外, Fe-Co-Zr 三元合金是典型的磁性金属材料, 同时 Fe-Co-Zr 基合金还被广泛的用作高温磁性材料及非晶态合金<sup>[9-11]</sup>。

Fe-Co 基合金除了被广泛用作磁性材料, 还被广泛用于制作高温合金。Fe-Co 高温合金中常常含有大量的合金元素, 各合金元素在合金中都起着非常的重要。其中 Co、Fe、Ni 用于形成奥氏体合金的基体, 部分 Co 还能起减少碳化物析出、改善合金的塑性和热加工性能的作用; Nb 的加入有助于合金的固溶强化、碳化物强化和含 Nb 合金的析出强化; Zr 等小直径的合金元素能以间隙原子或第二相的形式对晶界和在枝晶之间起强化作用<sup>[12]</sup>。

但目前有关 Fe-Co-Nb 和 Fe-Co-Zr 三元体系的相平衡及热力学信息的相关研究报道较少, 因此, 对 Fe-Co-Nb 和 Fe-Co-Zr 各三元系的相平衡进行实验测定及热力学优化是十分必要的。

## 1.2 相图及相图计算方法

随着科学技术的飞跃发展和生产需求的多样化, 现有的材料应用不断受到新的挑战。传统的结构材料在强度、硬度、塑性等方面已不能满足现代化工业生产的需要, 逐渐向功能的多样化和性能参数的更优化方向发展。

一般说来, 新材料的探索工作通常包括: 根据某种理论设想、晶体的结构类型或组成元素来寻找一种符合某种特殊性能的要求的新材料; 在某种性能较好的



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库